УДК 621.311.001

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЬГИНСКОГО ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО КОМБИНАТА

Андреев Михаил Владимирович[1],
andreevmv@tpu.ru

Боровиков Юрий Сергеевич[1],
borovikov@tpu.ru

Гусев Александр Сергеевич[1],
gusev_as@tpu.ru

Рубан Николай Юрьевич[1],
rubanny@tpu.ru

Сулайманов Алмаз Омурзакович[1],
sao@tpu.ru

Суворов Алексей Александрович[1],
suvorovaa@tpu.ru

Уфа Руслан Александрович[1],
hecn@tpu.ru

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы *заключается в необходимости разработки новых методов и средств повышения энергоэффективности промышленных предприятий.*
Цель работы: *создание на базе Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) платформы для разработки и испытаний методов и средств оптимизации режимов работы, а также повышения энергоэффективности Эльгинского горнодобывающего комбината в рамках пилотного проекта по созданию интеллектуальной электроэнергетической системы России – проекта «Эльгауголь».*
Методы исследования. *Решение поставленных задач обусловило необходимость применения широкого спектра теоретических и экспериментальных методов и способов исследования: теории линейных и нелинейных электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, теории автоматического регулирования и управления, теории точности и чувствительности вычислительных устройств, теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, схемотехники на интегральных микросхемах, IT-технологий, технологий FACTS и пр.*
Результаты. *Для решения поставленной в работе проблемы на базе ВМК РВ ЭЭС создана уникальная тестовая платформа, позволяющая провести всережимное исследование системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината. Кроме того, в ВМК РВ ЭЭС интегрирована модель системы автоматического управления (САУ) управляемыми шунтирующими реакторами (УШР). Проведено значительное количество исследований, фрагменты которых представлены в данной статье. Удалось выявить существенное влияние УШР под контролем САУ и разрабатываемой в рамках проекта «Эльгауголь» адаптивной автоматической системы оптимального управления и регулирования напряжения и реактивной мощности (ААСОУ) на режимы работы системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината. В частности, выявлено, что при увеличении мощности нагрузки в энергосистеме и, как следствие, значительном снижении напряжения на шинах ряда подстанций в районе комбината, данная система позволяет предотвращать останов электродвигателей, приводящих в движение различного рода насосы, вентиляторы и другое оборудование Эльгинского горнодобывающего комбината. Кроме того, удалось выявить значительное влияние УШР на динамическую устойчивость энергосистемы, а также на повышение энергоэффективности за счет снижения потерь по активной и реактивной мощностям. Полученные результаты моделирования стали основой для реальных проектных решений в рамках проекта «Эльгауголь».*

Ключевые слова:
Математическое моделирование, проект «Эльгауголь», энергоэффективность, гибридное моделирование, управляемый шунтирующий реактор.

Энергоэффективность любого крупного производства, в особенности ключевых для российской экономики добывающих производств (горнодобывающие, нефтегазодобывающие), зависит от расходуемой на него электроэнергии, значимую часть которой составляют потери, а также от бесперебойности и качества электроснабжения, особенно основного технологического оборудования, работу которого обеспечивает множество асинхронных и синхронных двигателей, образующих главную и

значительную, причем сугубо динамическую, электрическую нагрузку в системах электроснабжения (СЭС) промышленных энергорайонов.

Все обозначенные аспекты энергоэффективности взаимосвязаны, при этом, ввиду значительной энергоемкости ряда производств, их взаимовлияние с распределительной и магистральной сетями настолько велико, что требуется детальное планирование электрических режимов потребителя, учитывающее влияние их на питающую сеть с целью достижения максимальной энергоэффективности.

Зачастую возникает ситуация, когда режимы по напряжению и перетокам реактивной мощности, обеспечивающие минимум потерь, могут оказаться неприемлемыми по условиям устойчивости узлов нагрузки или при пусках и самозапусках электродвигателей. Вместе с тем возможно обеспечение и этих режимов при использовании современных быстродействующих устройств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, в том числе на базе силовой полупроводниковой электроники, являющихся основой гибких систем передачи переменного тока (Flexible Alternating Current Transmission Systems – FACTS) [1–12], например управляемых шунтирующих реакторов (УШР), статических тиристорных компенсаторов (СТК), статических компенсаторов (СТАТКОМ). Однако при этом необходимо определять наиболее эффективные места установки этих устройств и алгоритмы динамического автономного и системного (в рамках СЭС) управления ими.

Очевидно, что для решения данной задачи, обеспечивающего максимальную энергоэффективность, в том числе за счет минимизации потерь, необходим соответствующий инструмент для эффективного и достоверного планирования режимов, учитывающий взаимосвязь всех элементов сети и существующий режим работы. Основой для создания такого инструмента являются разработанная в ТПУ технология гибридного моделирования [13–16] электроэнергетических систем и созданный на её основе Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС).

ВМК РВ ЭЭС представляет собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему, реализованную на базе интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий (рис. 1).

Основные принципы построения данного комплекса:

1) ВМК РВ ЭЭС объединяет в себе адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессоров (СГП) всех элементов моделируемой схемы ЭЭС и информационно-управляющую систему (ИУС);
2) все СГП строятся по единому принципу, согласно которому каждый из них содержит соответствующий решаемой системе уравнений, определяемой типом оборудования, сопроцессор (СП), в общем случае составной, и унифицированную периферию, включающую программно-аппаратный интерфейс локальной компьютерной сети, продольные и поперечные цифроуправляемые пофазные коммутаторы;
3) все СП в СГП также строятся по единому принципу, в соответствии с которым каждый из них представляет собой работающую под управлением микропроцессора (-ов) параллельную цифроаналоговую структуру, обеспечивающую:
   а) непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в силовом оборудовании ЭЭС: энергоблоках, трансформаторах, линиях электропередачи и др.;
   б) преобразование формы представления информации: цифроаналоговое, аналого-цифровое, математическое аналоговое, трёхфазное модельное физическое;
   в) автоматизированное и автоматическое управление параметрами, настройками, продольными и поперечными коммутациями фаз и др.;
   г) моделирование релейной защиты и автоматики (РЗА), систем управления отдельных видов оборудования и ЭЭС в целом;
4) трёхфазные входы/выходы различных СГП через коммутатор трёхфазных узлов (КТУ) объединяются согласно моделируемой схеме ЭЭС, а информационный обмен микропроцессоров всех СГП с серверной ЭВМ осуществляется по локальной сети;
5) на серверной ЭВМ устанавливается специализированное программное обеспечение (СПО) ВМК РВ ЭЭС, в котором создаются базы данных, разнообразный программный инструментарий и в среде которого реализуются все информационно-управляющие возможности комплекса;
6) сервер ВМК РВ ЭЭС может быть подключен к корпоративной сети, в которой размещены клиентские компьютеры и на которых может быть установлено СПО клиента ВМК РВ ЭЭС, в том числе с регламентированными и защищёнными уровнями доступа к информационно-управляющим возможностям, текущим и архивным данным;
7) заложенные в ВМК РВ ЭЭС принципы построения исключают методическую ошибку в решении математических моделей элементов и, соответственно, совокупной модели ЭЭС в целом безотносительно к дифференциальному порядку, жёсткости и интервалу решения. Поэтому точность решения гарантирована и определяется только инструментальной погрешностью аппаратной части комплекса, минимизация которой обеспечивается применением прецизионных интегральных компонентов;

8) необходимый, современный и перспективный уровень метрологических и эксплуатационно-технических характеристик, технической эстетики и эргономики ВМК РВ ЭЭС обеспечивается соответствующими схемотехническими и программно-информационными решениями, ориентированными исключительно на применение новейших достижений интегральной цифровой и аналоговой микроэлектроники, компьютерной техники и программно-информационных технологий.

Таким образом, ВМК РВ ЭЭС, в отличие от существующих средств, полностью исключает необходимость декомпозиции режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС и позволяет осуществлять непрерывное, устойчивое и достоверное моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале совокупности процессов, протекающих в силовом оборудовании, электрических сетях и ЭЭС в целом, с учетом функционирования средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики (ПА), включая процессы в измерительных трансформаторах, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Для решения выше обозначенной проблемы авторами проведены исследования в рамках пилотного проекта ОАО «ФСК ЕЭС» по созданию интеллектуальной энергосистемы на базе энергокластера «Эльгауголь» [17–20], входящего в состав объединенной энергосистемы (ОЭС) Востока (рис. 2). Одними из основных элементов в силовой части

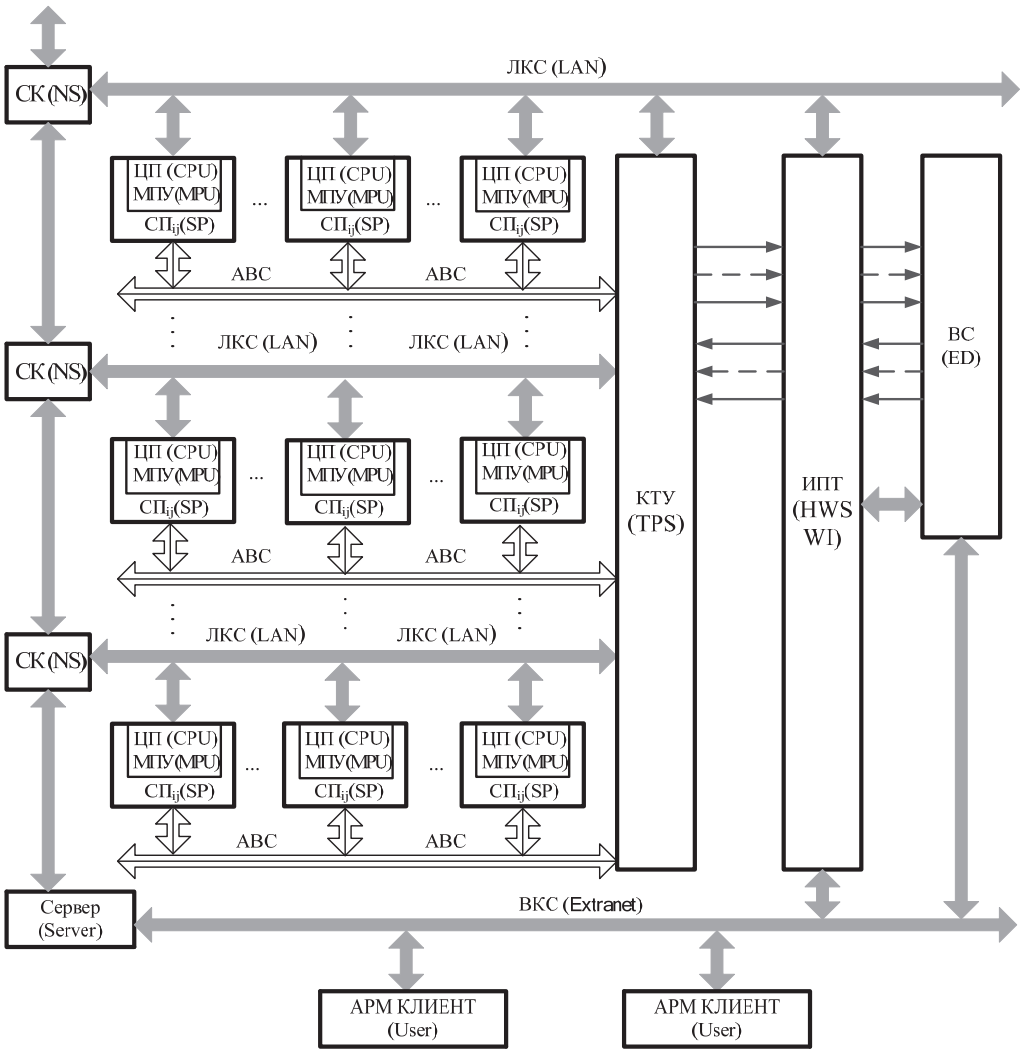

Рис. 1. *Структура ВМК РВ ЭЭС: ЦП – центральный процессор; СП – специализированный процессор; СК – сетевой коммутатор; ЛКС – локальная компьютерная сеть; ВКС – внешняя компьютерная сеть; АВС – трехфазные входы/выходы СП; КТУ – коммутатор трехфазных узлов; ИПТ – программно-технический интерфейс; ВС – внешние средства; МПУ – микропроцессорный узел*

Fig. 1. *Structure of HRTSim: TPS is the three-phase switch; HWSWI is the hardware and software interface; SP is the specialized processor; CPU is the central processing unit; MPU is the microprocessor unit; LAN is the local area network; NS are the network switches; ED is the external device; ABC are the physical three-phase inputs-outputs*

энергокластера являются управляемые шунтирующие реакторы (УШР): УШР-25000/110, РТУ-100000/220-УХЛ1. Реактор мощностью 100 МВАр планируется установить на подстанции (ПС) «Призейская», от которой осуществляется электроснабжение энергокластера, а два реактора по 25 МВАр – на ПС «Эльгауголь».

Локальное управление УШР осуществляется системой автоматического управления (САУ). Основные функции данной системы:

- стабилизация напряжения в точке подключения;
- управление током реактора;
- управление степенью загрузки УШР по реактивной мощности.

Система снабжена гистерезисным регулятором, которым при загрузке УШР по реактивной мощности до минимального/максимального уровня и удержании этого уровня в течение определенного времени осуществляется включение/отключение одного или поочередно нескольких блоков конденсаторных батарей (БСК). Кроме того, в состав САУ УШР входит ряд внутренних защит реактора и БСК: защита от перегрузки, от потери напряжения и перенапряжения.

Централизованное управление УШР ПС «Призейская» и «Эльгауголь» осуществляется с помощью адаптивной автоматической системы оптимального управления и регулирования напряжения и реактивной мощности (ААСОУ), которой в зависимости от режимных параметров в ЭЭС выдаются уставки в САУ соответствующих УШР. Организованное таким образом управление группой средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) на данных подстанциях позволяет поддерживать нормативный уровень напряжения во всем энергокластере, включающем в себя четыре подстанции и сети высокого напряжения основного потребителя – горнодобывающего комбината.

В рамках проекта «Эльгауголь» на базе ВМК РВ ЭЭС создана программно-аппаратная платформа для тестирования и настройки адаптивного регулятора ААСОУ, в частности для решения следующих задач:

- подбор рабочих диапазонов параметров регулятора ААСОУ;
- проверка достаточности мощности, количества и оптимальности мест установки, предусмотренных проектом СКРМ, для решения задач ААСОУ;
- проверка эффективности решений использования ААСОУ;
- проверка условий статической и динамической устойчивости энергокластера и прилегающей сети;
- исследование и анализ нормальных и аварийных режимов в питающей сети, сети энергокластера и электроустановках потребителей энергокластера, в том числе мощной двигательной нагрузки.

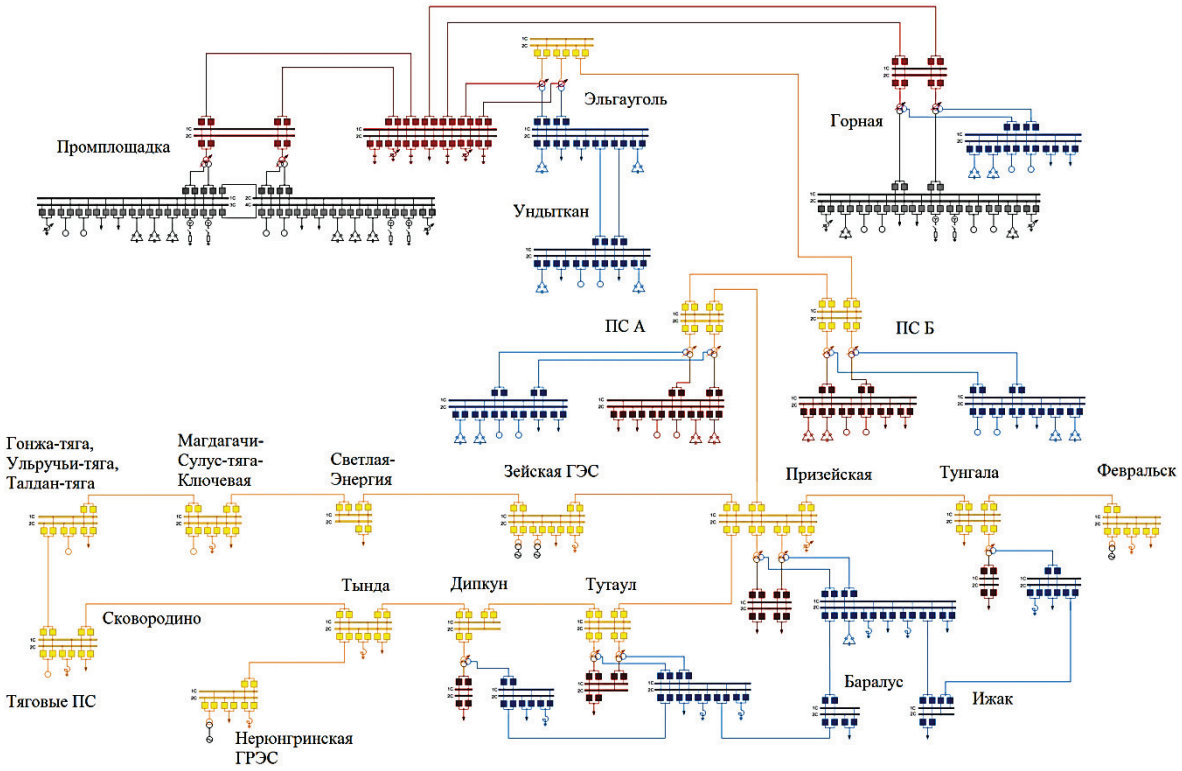

Рис. 2. *Схема моделируемой энергосистемы*

Fig. 2. *Scheme of modeled power system*

Разработанная трехфазная схема моделирования энергокластера «Эльгауголь» содержит:

- энергоблоки – 4;
- автотрансформаторы и трансформаторы – 16;
- линии электропередачи – 27;
- обобщенную нагрузку – 47;
- двигатели асинхронные и синхронные – 120;
- шунтирующие реакторы – 12;
- конденсаторные батареи – 26;
- управляемые шунтирующие реакторы – 7.

Решение поставленных задач предполагает исследование совместной работы регулятора ААСОУ и САУ УШР подстанций «Призейская» и «Эльгауголь». В связи с этим на основании анализа систем управления реакторов, установка которых планируется в энергокластере, создана и интегрирована в ВМК РВ ЭЭС модель САУ УШР.

Ниже представлены фрагменты результатов исследований в рамках проекта «Эльгауголь», выполненные на ВМК РВ ЭЭС (рис. 3–10).

Согласно рис. 4 при отключенных САУ УШР ПС «Эльгауголь» на этапе «сброса» нагрузки напряжение возрастает до уровня, значительно превышающего 5%-ю зону относительно заданной уставки, в отличие от эксперимента, когда данные средства включены. Другое и главное отличие этого эксперимента от представленного на рис. 3 – то, что во время набора нагрузки произошло значительное снижение напряжения, что в конечном счете привело к остановке асинхронных двигателей на ПС «Промплощадка» и ПС «Горная», питаемых от шин 110 кВ ПС «Эльгауголь». Вследствие этого активная мощность линий, отходящих от шин 110 кВ ПС «Эльгауголь», резко уменьшилась, а реактивная мощность увеличилась. Данный тест (и ряд других тестов, не описанных здесь) подтверждает эффективность разрабатываемой системы (ААСОУ) для поддержания устойчивой работы энергокластера и прилегающей периферии.

Сравнив рис. 5 и 6, становится очевидным, что активные и реактивные потери в энергокластере при отключенных САУ УШР выше, чем при включенных. Отсюда можно сделать вывод о том, что установка САУ УШР и подобных систем повышает эффективность работы энергосистемы и уменьшает суммарные потери электроэнергии.

На рис. 7 и 8 приведены результаты экспериментов, демонстрирующие влияние САУ УШР, БСК на динамическую устойчивость энергокластера. На рис. 7 представлен график изменения нагрузки на шинах 110 кВ ПС «Эльгауголь» при включенных САУ УШР, БСК. В некоторый момент времени моделируется короткое замыкание на шинах 110 кВ ПС «Горная», которая питается по двум ЛЭП от ПС «Эльгауголь». Затем происходит срабатывание РЗ и повреждение локализуется. При этом устойчивость в энергокластере и во всей ЭЭС сохраняется, о чем свидетельствуют взаимные (угол ротора синхронной машины относительно угла ротора ведущей машины) углы δ генераторов. На рис. 7 представлены результаты аналогичного эксперимента, за исключением того, что САУ УШР, БСК отключены. Очевидно, что после короткого замыкания синхронный режим в ЭЭС нарушается.

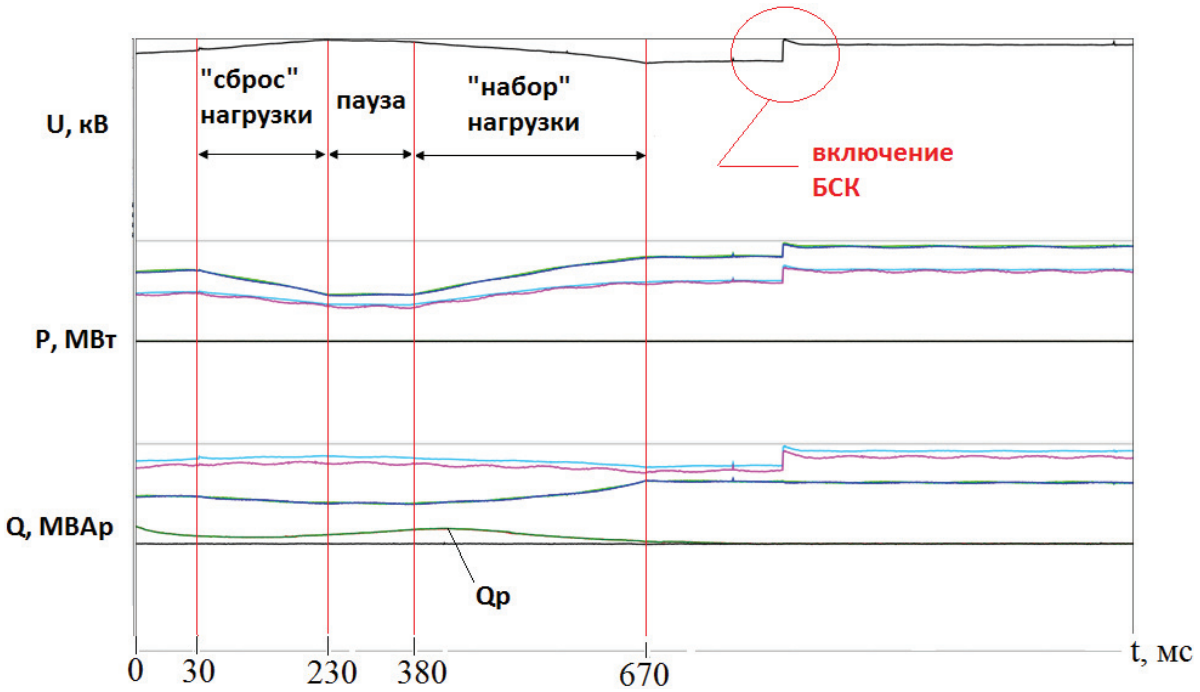

Рис. 3. *График изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» при включенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»*

Fig. 3. *Real time data oscillogram of changes of power of load connected to 110kV-bus of Elgaugol substation (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are operated)*

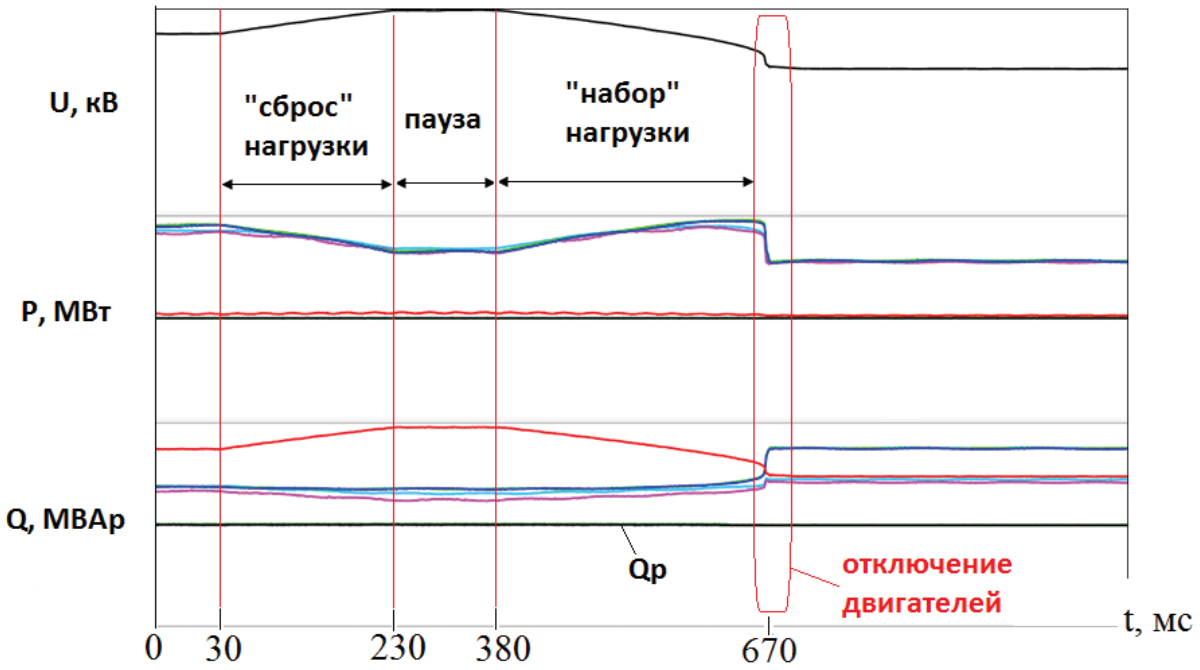

Рис. 4. *График изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» при отключенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»*

Fig. 4. *Real time data oscillogram of changes of power of load connected to 110kV-bus of Elgaugol substation (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are disabled)*

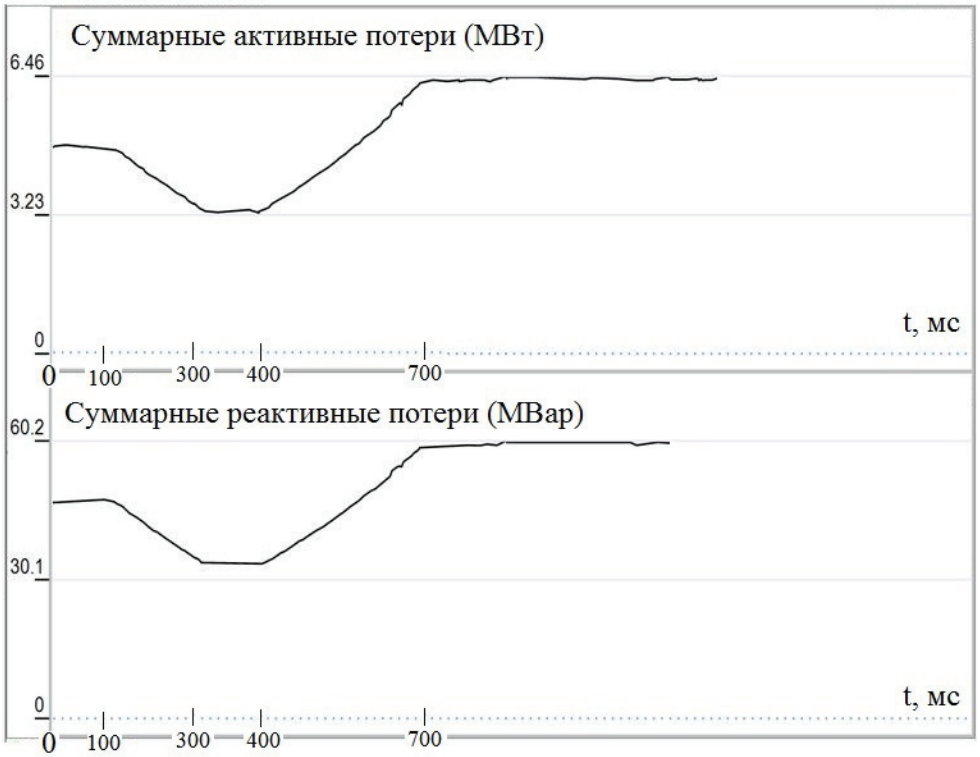

Рис. 5. *Суммарные активные и реактивные потери в энергокластере при включенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»*

Fig. 5. *Total active and reactive power losses in energy cluster (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are operated)*

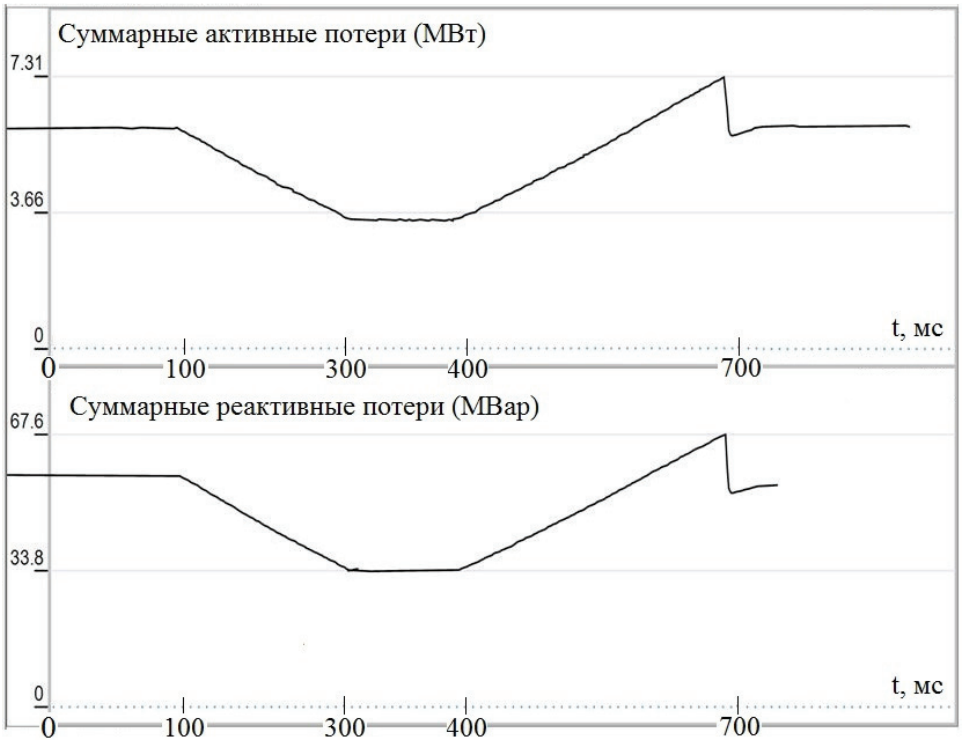

Рис. 6. *Суммарные активные и реактивные потери в энергокластере при отключенных САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь»*

Fig. 6. *Total active and reactive power losses in energy cluster (TCRr's ACSs of Elgaugol substation are disabled)*

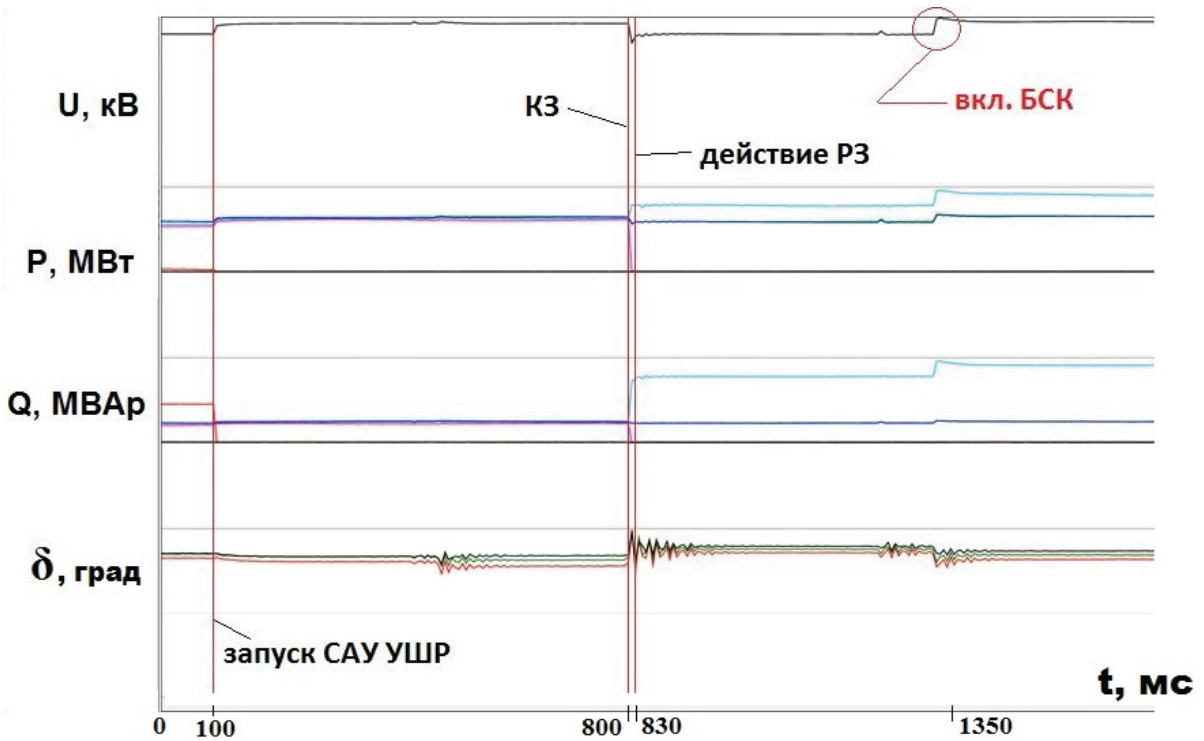

Рис. 7. *Осциллограммы изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при отключении одной из питающих линий энергокластера (САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь» включены).*

Fig. 7. *Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after short circuit occurrence in the 110-kV buses of the Gornaya substation (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation operated)*

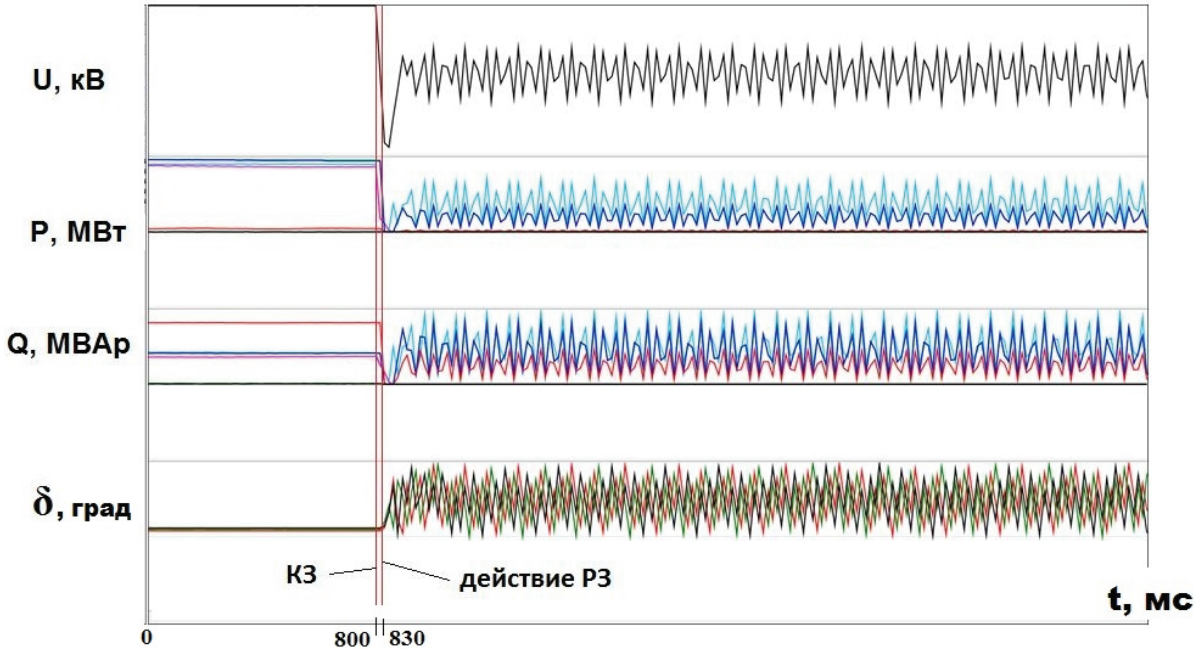

Рис. 8. *Осциллограммы изменения режимных параметров нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при КЗ на одном из присоединений (САУ УШР ПС «Эльгауголь» отключены).*

Fig. 8. *Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after short circuit occurrence in the 110-kV buses of the Gornaya substation (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation disabled)*

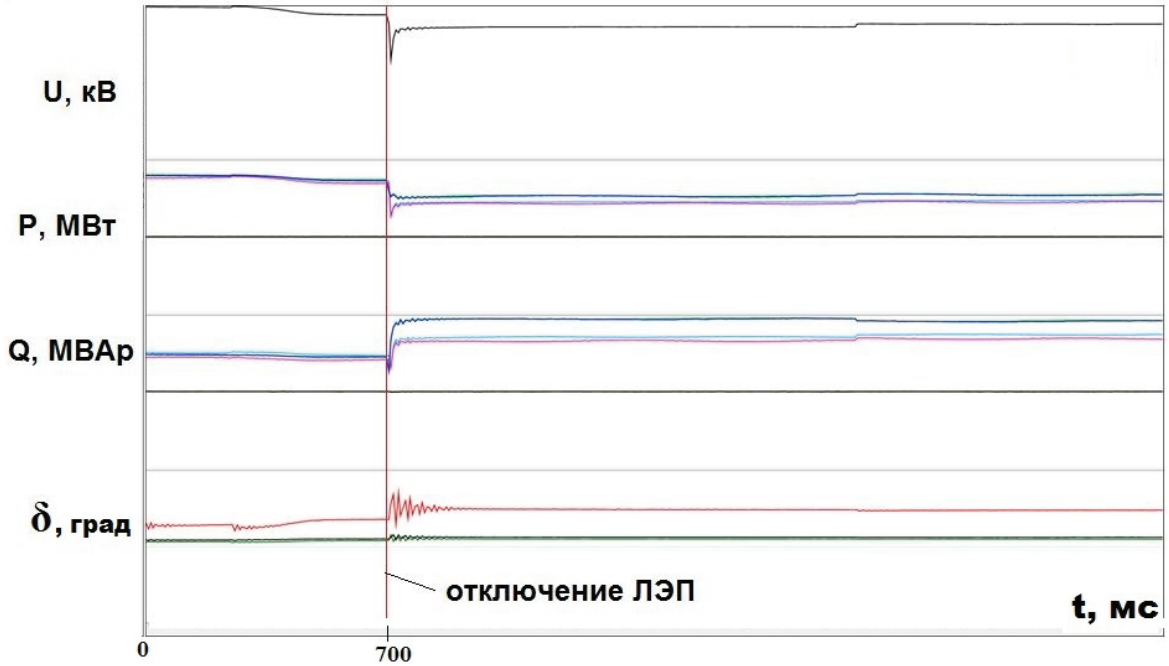

Рис. 9. *Осциллограммы изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при отключении одной из питающих линий энергокластера (САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь» включены).*

Fig. 9. *Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after disconnection of a power line supplying the energy cluster (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation operated)*

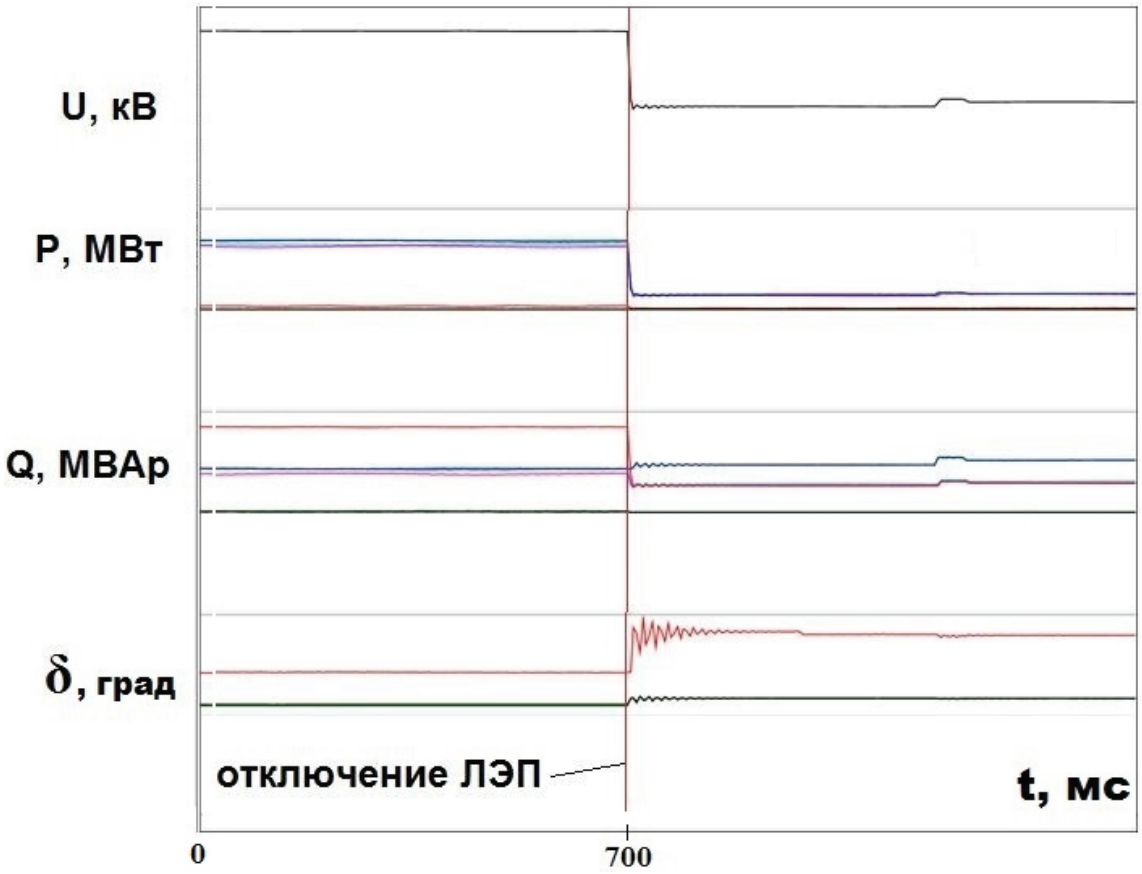

Рис. 10. *Осциллограммы изменения нагрузки шин 110 кВ ПС «Эльгауголь» и взаимных углов генераторов в ЭЭС при отключении одной из питающих линий энергокластера (САУ УШР, БСК ПС «Эльгауголь» отключены)*

Fig. 10. *Real time data oscillogram of power dissipated in the load connected to the 110-kV bus of the Elgaugol substation and mutual angles of the generators after disconnection of a power line supplying the energy cluster (TCRr's ACSs of the Elgaugol substation disabled)*

На рис. 9 и 10 представлены результаты эксперимента по оценке динамической устойчивости энергокластера и ЭЭС в целом при отключении одной из ЛЭП 220 кВ ПС «Призейская» – ПС А, питающей энергокластер.

Результаты экспериментов при включенных (рис. 9) и отключенных (рис. 10) САУ УШР, БСК показали, что динамическая устойчивость ЭЭС может быть сохранена в обоих случаях, однако при блокированных устройствах FACTS отключение обозначенной выше линии приводит к резкому снижению напряжения и останову двигателей ПС «Промплощадка» и ПС «Горная», питающихся от ПС «Эльгауголь».

Объем данной статьи не позволяет вместить результаты большого количества тестов, проводимых в рамках проекта. Можно лишь сказать, что все они подтвердили эффективность группы УШР и БСК под управлением ААСОУ, а также позволили сформировать оптимальные параметры и настройки программно реализованного регулятора ААСОУ.

Исследования, проведенные в рамках проекта «Эльгауголь», в том числе и представленные в данной работе, подтверждают возможность эффективного использования ВМК РВ ЭЭС как платформы для решения задач разработки, проектирования, исследования и управления СЭС и ЭЭС. Характеристики и свойства комплекса, приобретенные вследствие уникальной программно-технической архитектуры, кратко описанной в начале данной статьи, определяют превосходство ВМК РВ ЭЭС над аналоговыми и гибридными устройствами моделирования прошлых лет.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука» № 2.1655.2016 от 01.01.2016, тема: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multiple FACTS devices integration through distributed control system and its application on the GCC interconnection / T. Masood, S.A. Qureshi, R.K. Aggarwal, D.P. Kothari // 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC). – Doha, 2013. – P. 64–69.
2. Nazarloo A., Hosseini S.H., Babaei E. Flexible D-STATCOM Performance as a Flexible Distributed Generation in Mitigating Faults // 2nd power electronics drive systems and technologies conference. – Tehran, 2011. – P. 568–573.
3. Ghahremani E., Kamwa I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface // IEEE Transactions on Power Systems – 2013. – V. 28. – Iss. 2. – P. 764–778.
4. Hingorani N. Flexible AC transmission // IEEE Spectrum. – 1993. – V. 30. – № 4. – P. 40–45.
5. Rahimzadeh S., Tavakoli M., Viki A. Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment // IET Gener. Transm. Distrib. – 2009. – V. 4. – № 3. – P. 349–362.
6. Gerbex S., Cherkaoui R., Germond A.J. Optimal placement of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms // IEEE Trans. Power Syst. – 2001. – V. 16. – № 3. – P. 537–544.
7. Mohammadzadeh Niaki A.H., Dabaghian Amiri I. The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance // 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI). – Tehran, 2015. – P. 348–354.
8. Singh A.R., Patne N.R., Kale V.S. Adaptive distance protection setting in presence of mid-point STATCOM using synchronized measurement // Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – V. 67. – P. 252–260.
9. Обзор существующих решений по алгоритмам управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ / Е.А. Кукарекин, Ю.О. Соловьёва, А.О. Лаптев, К.В. Хацевский // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2015. – № 1. – С. 217–221.
10. Ненахов А.И. Перспективы использования устройств компенсации типа СТАТКОМ в сетях промышленных предприятий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 10. – С. 30–36.
11. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. О влиянии быстродействия управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа на стабилизацию напряжения и электромеханические переходные процессы // Электричество. – 2015. – № 5. – С. 4–14.
12. Долгополов А.Г. Этапы развития управляемых шунтирующих реакторов для электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения // Энергетик. – 2013. – № 6. – С. 55–60.
13. Всережимное моделирование в реальном времени перенапряжений в электроэнергетических системах / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7. – С. 17–21.
14. Полигон для отработки решений по построению активно-адаптивных сетей на базе всережимного моделирующего комплекса реального времени / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, М.В. Андреев, Р.А. Уфа // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 292–296.
15. Андреев М.В., Боровиков Ю.С. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 53–61.
16. Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 17–20.
17. Дорофеев И.Н., Летуновский Д.Н., Маргулян А.М. Пилотный проект активно-адаптивной сети кластера «Эльгауголь» – задачи создания и основные технические решения // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 3. – С. 70–77.
18. Волошин Е.А., Волошин А.А. Опыт разработки и задачи перспективного развития систем автоматического управления средствами компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения // Энергетик. – 2013. – № 6. – С. 41–43.
19. Шеметова В.Г. Оценка эффективности освоения Эльгинского месторождения // Регион: Экономика и Социология. – 2011. – № 4. – С. 200–210.
20. Янченко А.С., Козлов А.Н. Разработка идеологии и структуры цифровой подстанции для энергокластера «Эльгауголь» // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2014. – № 67. – С. 80–84.

Поступила 20.06.2016 г.

Информация об авторах

Андреев М.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Боровиков Ю.С., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гусев А.С., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рубан Н.Ю., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сулайманов А.О., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Суворов А.А., ассистент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Уфа Р.А., ассистент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.001

STUDY OF INFLUENCE OF THYRISTOR CONTROLLED REACTORS ON THE REGIMES OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF ELGA COAL MINING COMPLEX

Mikhail V. Andreev[1],
andreevmv@tpu.ru

Yury S. Borovikov[1],
borovikov@tpu.ru

Alexander S. Gusev[1],
gusev_as@tpu.ru

Nikolay Y. Ruban[1],
rubanny@tpu.ru

Almaz O. Sulaymanov[1],
sao@tpu.ru

Aleksey A. Suvorov[1],
suvorovaa@tpu.ru

Ruslan A. Ufa[1],
hecn@tpu.ru

[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to develop new methods and means of improving the energy efficiency of industrial enterprises.

The main aim of the study *is to create on the basis of Hybrid Real-Time Power System Simulator (HRTSim) a platform for developing and testing methods and tools for optimization of operating regimes, as well as energy efficiency of Elga coal mining complex in the framework of the pilot project on the creation of intelligent electric power system of Russia – the project «Elgaugol».*

The methods used in the study. *Solution of the tasks determined the necessity to use a wide range of theoretical and experimental methods and techniques of research: the theory of linear and non-linear electrical circuits with lumped and distributed parameters, automatic control and control theory, the theory of precision and sensitivity of computing devices, sampling methods of the theory of ordinary differential equations, continuous implicit methodically precise integration of differential equations, the circuitry on integrated circuits, IT-technologies, FACTS technologies etc.*

The results. *To solve the problem of the research the unique test platform based on the HRTSim was developed. The platform allows all-regimes studying of power supply system of the Elga mining enterprise. In addition, the model of the automatic control system (ACS) of thyristor controlled reactors (TCR) is integrated into the HRTSim. A considerable amount of researches has been carried out. The fragments of these researches are introduced in the paper. It was possible to identify a significant impact of TCR under the control of ACS and developed within the project «Elgaugol» active-adaptive voltage and var control system (AAVVCS) in the operating regimes of power supply system of the Elga coal mining complex. In particular, it was found that at incensement of loads in power system and, as a consequence, a significant reduction of voltages on the bus-bars of a number of substations in the area of the mining enterprise, the developed system prevents the stop of motors driving the various kinds of pumps, fans and other equipment of the Elga coal mining complex. In addition, it was possible to identify a significant impact of TCRs on the dynamic stability of power system, as well as energy efficiency by reducing the losses of active and reactive power. These simulation results were the basis for the actual design solutions within the framework of the project «Elgaugol».*

Key words*:*
Mathematical simulation, project «Elgaugol», energy efficiency, hybrid simulation, thyristor controlled reactor.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, State Task «Nauka» no 2.1655.2016, 01.01.2016, subject: «Development and research of a hybrid model of asynchronous tie insert in power systems».

REFERENCES

1. Masood T., Qureshi S.A., Aggarwal R.K., Kothari D.P. Multiple FACTS devices integration through distributed control system and its application on the GCC interconnection. *7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)*. Doha, 2013, pp. 64–69.
2. Nazarloo A., Hosseini S.H., Babaei E. Flexible D-STATCOM Performance as a Flexible Distributed Generation in Mitigating Faults. *2nd power electronics drive systems and technologies conference*. Tehran, 2011. pp. 568 – 573.
3. Ghahremani E., Kamwa I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a gen-

eric graphical user interface. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, no. 2, pp. 764–778.
4. Hingorani N. Flexible AC transmission. *IEEE Spectrum*, 1993, vol. 30, no. 4, pp. 40–45.
5. Rahimzadeh S., Tavakoli M., Viki A. Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment. *IET Gener. Transm. Distrib*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 349–362.
6. Gerbex S., Cherkaoui R., Germond A.J. Optimal placement of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms. *IEEE Trans. Power Syst*., 2001, vol. 16, no. 3, pp. 537–544.
7. Mohammadzadeh Niaki A.H., Dabaghian Amiri I. The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance. *2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*. Tehran, 2015. pp. 348–354.
8. Singh A.R., Patne N.R., Kale V.S. Adaptive distance protection setting in presence of mid-point STATCOM using synchronized measurement. *Electrical Power and Energy Systems*, 2015, vol. 67, pp. 252–260.
9. Kukarekin E.A., Solovev Yu.O., Laptev A.O., Khatsevsky K.V. Obzor sushchestvuyushchikh resheny po algoritmam upravleniya staticheskim kompensatorom reaktivnoy moschnosti tipa STATKOM [Review of existing solutions on algorithms for controlling STATCOM type static var compensator]. *Rossiya molodaya: peredovyie tehnologii – v promyishlennost!*, 2015, no. 1, pp. 217–221.
10. Nenakhov A.I. Perspektivy ispolzovaniya ustroystv kompensatsii tipa STATKOM v setyah promyishlennyih predpriyatiy [Prospects of using the devices such as STATCOM compensation in industrial networks]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2015, no. 10, pp. 30–36.
11. Shakaryan Yu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P. Effect of speed of the controlled shunt reactor of transformer type on stabilization of voltage and electromechanical transients. *Electricity*, 2015, no. 5, pp. 4–14. In Rus.
12. Dolgopolov A.G. Stages of development of controlled shunt reactors for electrical networks of high voltage and extra high voltage. *Energetik*, 2013, no. 6, pp. 55–60. In Rus.
13. Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Andreev M.V. Vserezhimnoe modelirovanie v realnom vremeni perenapryazheniy v elektroenergeticheskih sistemah [All-regimes real-time simulation of surge in electric power systems]. *Automation in industry*, 2014, no. 7, pp. 17–21.
14. Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Andreev M.V., Ufa R.A. Poligon dlya otrabotki resheniy po postroeniyu aktivno-adaptivnyih setey na baze vserezhimnogo modeliruyuschego kompleksa realnogo vremeni [Testbed based on hybrid real-time power system simulator for research and development of active-adaptive networks]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2014, no. 4, pp. 292 – 296.
15. Andreev M.V., Borovikov Yu.S. Optimization of transformers differential protection settings with its adequate mathematical models. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 3, pp. 53–61.
16. Sulaymanov A.O., Andreev M.V., Ruban N.Yu. Concept of adequate modeling of relay protection and emergency automation of power systems. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 17–20. In Rus.
17. Dorofeev I.N., Letunovskiy D.N., Margulyan A.M. Pilotny proekt aktivno-adaptivnoy seti klastera «Elgaugol» – zadachi sozdaniya i osnovnye tekhnicheskie resheniya [Pilot project of active-adaptive grid of «Elgaugol» cluster – the tasks of creating and main technical solutions]. *Relay protection and automation*, 2011, no. 3, pp. 70–77.
18. Voloshin E.A., Voloshin A.A. Experience in development and problems of perspective development of automatic control systems by means of reactive power compensation and voltage regulation. *Energetik*, 2013, no. 6, pp. 41 – 43. In Rus.
19. Shemetova V.G. Evaluating the effectiveness of the development of the Elga reserve. *Region: Economics and Sociology*, 2011, no. 4, pp. 200–210. In Rus.
20. Yanchenko A.S., Kozlov A.N. Razrabotka ideologii i struktury tsifrovoy podstantsii dlya energoklastera «Elgaugol» [Development of the ideology and structure of digital substation for power cluster «Elgaugol»]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyie i ekonomicheskie nauki*, 2014, no. 67, pp. 80–84.

Received: 20 June 2016.

Information about the authors

Mikhail V. Andreev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yury S. Borovikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Gusev, Dr. Sc., associate professor, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay Y. Ruban, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Almaz O. Sulaymanov, Cand. Sc., associate professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey A. Suvorov, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ruslan A. Ufa, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.